



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών**

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του **Υ.Δ. κ. Μουσμμούλη Γεωργίου** του Χρήστου, κατόχου Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα **Ρευστών**. Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί την Πέμπτη 25 Ιουνίου 2020, ώρα 11:00π.μ διαδικτυακά*. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής :

«Ανάπτυξη μεθοδολογίας διάγνωσης σπηλαιώσης σε υδροδυναμικές μηχανές με πειραματικά και υπολογιστικά εργαλεία »

Και ο Αγγλικός ως εξής:

«Development of Cavitation detection methodology for hydraulic turbomachines using experimental and numerical tools»



Ο Κοσμητορας της Σχολής

Ν. Μορμαβός
Καθηγητής Ε.Μ.Π

- Για οδηγίες για την πρόσβαση σας διαδικτυακά απευθυνθείτε στον Υ.Δ. τον κ. Γ.Μουσμμούλη (mousmoulisgeorge@gmail.com) ή στον Επιβλέποντα του Καθ. Ι. Αναγνωστόπουλο (j.anagno@fluid.mech.ntua.gr)

Title: Development of cavitation detection methodology for hydraulic turbomachines using experimental and numerical tools

Τίτλος: Ανάπτυξη μεθοδολογίας διάγνωσης σπηλαιώσης σε υδροδυναμικές μηχανές με πειραματικά και υπολογιστικά εργαλεία

Abstract

Centrifugal pumps constitute one of the most common and essential component in most industrial procedures and other technical works and applications, while hydraulic turbines operate in numerous hydroelectric power plants worldwide, producing a substantial percentage of the consumed electricity. Consequently, the reliable and efficient operation of these machines is highly required. An important hydraulic excitation mechanisms that may affect the steady and dynamic operation of a hydraulic turbomachinery is cavitation, which may be created in the low static pressure zone of the rotor. The re-liquification of the vapour bubbles at downstream positions is a very violent implosion procedure that generates shock pressure waves of extreme local intensity, which can cause extended wear of the solid surfaces of the machine. Long-term operation of a machine under cavitating conditions results in significant material removal, accompanied by strong vibrations and drop of performance. The present Thesis deals with the analysis of the flow conditions in centrifugal pumps that suffer from cavitation, and aims at the development of detection tools capable to identify the presence of vapour formations promptly.

The present work attempts to approach the problem both experimentally and computationally. Two testing configurations that allow the flow visualisation of the phenomenon are developed: one at the Engineering Department of Lancaster University (LU) and one at the Laboratory of Hydraulic Turbomachines of the NTUA. In both test rigs, the regulation of the pump suction conditions (static pressure) is achieved by throttling the suction valve. The pump installed at the LU has its volute made from transparent material and uses three semi-open, radial impellers; i) one with six backward-curved blades and six splitter blades, ii) one with twelve radial blades, and iii) one with twelve forward-curved blades. On the other hand, the test configuration of the NTUA incorporates an industrial centrifugal pump with a closed impeller that has five backward-curved blades. Significant modifications are made to this pump in order to allow the visualization of the flow in its impeller. More specifically, the impeller is re-manufactured from scratch, with the shroud made of transparent material, while a transparent window is opened in the front casing of the pump.

Performance experiments are conducted for all four impellers and they are accompanied by noise and vibration measurements, as well as flow visualization observations. Two accelerometers and one acoustic emission sensor are used in each test rig, and their time-series measurements are processed so as to extract cavitation characteristics and develop a detection tool of general application. The signals obtained are processed in the time and frequency domain, with the application of statistical, Root Mean Square and Power Spectral Density tools. Moreover, the Spectral Kurtosis methodology for the demodulation of the signals and the study of the envelope's characteristics is implemented and tested in the framework of the Thesis.

In parallel, the fluid flow in two of the impellers is simulated under normal and two-phase flow conditions with the use of a commercial CFD algorithm. The modelling approach solves the Reynolds Averaged Navier Stokes Equations (RANS), along with a transport equation that regulates the mass transfer between the vapour and the liquid phase. The turbulence is modelled

with the $k-\omega$ SST model, while the equations of the flow that correspond to the computational domain of the impeller are solved in the rotating reference frame ('frozen' rotor approach).

The characteristic operation curves derived for each impeller of the two test configurations, exhibit the expected trend of low specific speed centrifugal pumps. During cavitating conditions, the total head value remains unchanged until the point where the vapour cavity starts to block the flowpath and finally, makes the impeller unable to provide power to the working medium (head break down). The flow visualisation data in the LU impellers depict the inception of the cavitation phenomenon and the progressive increase of its extent, as the available suction head level of the test rig decreases. Moreover, the photos obtained from the impellers' flow field, feature the existence of different large-scale cavitating formations, such as travelling bubble, cloud, tip clearance, and attached cavitation.

The flow visualization data and the laboratory measurements confirm the ability of the numerical model to reproduce the total head drop curve due to vapour phase development. The model faces difficulties to identify the vapour travelling bubbles close to their visual onset, due to their strong dynamic nature. However, its ability to predict the actual size and shape of the cavities improves significantly when the attached cavitation mechanism becomes stronger, at the intermediate stages of cavitation development, and well before the total head drop. In the NTUA pump, the computational results are also used to provide an improved prediction for the visual inception point of cavitation. Consequently, the proposed modelling approach can be used for detection of cavitation, provided that both the geometrical and operational data of a pump are given. Moreover, in case of the unshrouded impeller, the numerical results designate the complex flow pattern at the blades tip clearance region, which includes secondary flows that recirculate part of the tip flow, back to the suction side of the blade, forming the backflow phenomenon. The latter may turn to backflow tip cavitation, when the pump operates under low static pressure conditions.

The noise and vibration results are obtained using the AE and accelerometer sensors, which are located on the body of the centrifugal pumps in both configurations. The raw noise and vibration data measured under severe cavitating conditions include peaks that are related to bubble implosion and affect their Gaussian distribution. The statistical analysis of the data associate these differentiations with the fourth statistical moment, the kurtosis parameter, which value deviates significantly from that of the normal distribution. The examination of the frequency spectrum of the noise and vibration signals illustrates the excitation of the wide ranges of the frequency spectrum. The use of RMS and powerband tools is qualified so as to integrate the power of the excited areas and plot it as function of suction conditions. The results demonstrate the successful use of these tools for the prompt detection of cavitation in the vast majority of the examined conditions. However, their difficulty to unmask the phenomenon in low loading conditions of the closed impeller, along with the risk to detect a different kind of impulsive fault (like faults related with rolling-element bearings) instead of cavitation, makes necessary the further analysis of the obtained signals.

For that reason, the Spectral Kurtosis signal processing method is tested to efficiently provide the band pass filter's characteristics that aim to unmask cavitation behaviour. In addition, the filtered signals are demodulated with the use of Hilbert Transformation, so as to confirm the possible periodicity of the characteristics depicted in the filtered signals. The results prove the successful implementation of this methodology that manages to distinguish the appearance of impulses in the filtered signals, which are modulated by the blade passing frequency (BPF) component. The proposed approach specifies the analogy between the impulsive behaviour of the filtered signal and the shock pressure mechanism, and between the BPF modulation of the impulses with the shock pressure waves that occur in the rotating impeller. The latter relate the detection characteristics with the physical mechanism of cavitation wear, and can constitute a robust and reliable detection tool of general application in hydraulic turbomachinery.

Περίληψη

Από τις πιο συχνά απαντώμενες μηχανές στις διάφορες βιομηχανικές εγκαταστάσεις και τεχνικά έργα είναι οι φυγοκεντρικές αντλίες, ενώ οι υδροστρόβιλοι λειτουργούν σε ένα μεγάλο αριθμό υδροηλεκτρικών έργων, σε όλο τον κόσμο, παράγοντας σημαντικό μέρος της καταναλώμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς, η ομαλή και αποτελεσματική επίτευξη μιας πληθώρας τεχνικών λειτουργιών, βιομηχανικών διεργασιών και παραγωγικών δραστηριοτήτων βασίζεται στην αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία αυτών των υδροδυναμικών μηχανών. Ένας από τους ροϊκούς μηχανισμούς που μπορεί να διαταράξει τη λειτουργία αυτών των μηχανών, είναι η σπηλαίωση, δηλαδή η τοπική εξάτμιση του υγρού (συνήθως νερού), η οποία δημιουργείται όταν η πίεση σε κάποια σημεία εντός του ρότορα μειωθεί σε τιμές κάτω από την πίεση ατμοποίησης στη θερμοκρασία λειτουργίας. Η επανυγροποίηση των φυσαλίδων ατμού σε περιοχές όπου η στατική πίεση επανέρχεται σε υψηλότερες τιμές, γίνεται μέσω της ενδόρρηξης τους, μια απότομη μεταβολή φάσης, η οποία ακολουθείται από την ανάπτυξη τοπικών κρουστικών κυμάτων πίεσης, προκαλώντας διάβρωση των στερεών εσωτερικών επιφανειών της μηχανής. Λειτουργία μιας υδροδυναμικής μηχανής υπό συνθήκες σπηλαίωσης, ακόμη και σε σύντομο διάστημα, μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες φθορές που συνοδεύονται από αύξηση των μηχανικών ταλαντώσεων και πτώση του βαθμού απόδοσης. Η παρούσα Διατριβή, ασχολείται με την ανάλυση των χαρακτηριστικών της ροής σε φυγοκεντρικές αντλίες, στις οποίες αναπτύσσεται το φαινόμενο της σπηλαίωσης, και έχει ως στόχο την ανάπτυξη εργαλείων που να μπορούν να διαγνώνουν έγκαιρα τον σχηματισμό φυσαλίδων ατμού.

Το πρόβλημα προσεγγίζεται τόσο πειραματικά όσο και υπολογιστικά. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται δύο εργαστηριακές διατάξεις, οι οποίες επιτρέπουν την οπτική παρατήρηση του φαινομένου εντός των εξεταζόμενων μηχανών: μια διάταξη εγκατεστημένη στο Τμήμα Μηχανικών του Πανεπιστημίου του Λάνκαστερ (LU - Ην. Βασ.) και μία στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών του ΕΜΠ. Η αντλία που βρίσκεται εγκατεστημένη στο LU έχει το κέλυφος της κατασκευασμένο από διαφανές υλικό, ενώ στη συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιούνται τρεις περωτές ακτινικής ροής ημι-ανοικτού τύπου (χωρίς στεφάνη), με οπισθοκλινή, με ακτινικά και με εμπροσθοκλινή πτερύγια. Από την άλλη, η πειραματική διάταξη του ΕΜΠ περιλαμβάνει μια τυπική βιομηχανική φυγοκεντρική αντλία, με κλειστού τύπου περωτή, με οπισθοκλινή πτερύγια. Στην αντλία του ΕΜΠ έγιναν σημαντικές τροποποιήσεις, ώστε να επιτραπεί η διενέργεια οπτικών παρατηρήσεων εντός της περωτής, που περιλαμβάνουν ανακατασκευή της περωτής με στεφάνη κατασκευασμένη από διαφανές υλικό, και διάνοιξη διαφανούς παραθύρου στην εμπρόσθια πλευρά του κελύφους.

Οι πειραματικές μετρήσεις περιλαμβάνουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των τεσσάρων περωτών, οι οποίες συνοδεύονται από μέτρησεις θορύβου και μηχανικών ταλαντώσεων, καθώς επίσης και από οπτικές παρατηρήσεις εντός της ροής. Σε κάθε διάταξη, χρησιμοποιούνται δύο επιταχυνσιόμετρα και ένας αισθητήρας ακουστικών σημάτων (acoustic emission), ενώ οι χρονοσειρές που λαμβάνονται αναλύονται και μελετώνται με στόχο την αναγνώριση των χαρακτηριστικών του φαινομένου και την ανάπτυξη ενός γενικού κριτηρίου διάγνωσης της σπηλαίωσης. Πιο συγκεκριμένα, τα σήματα επεξεργάζονται στα πεδία χρόνου και συχνότητας με χρήση εργαλείων στατιστικής, μέσης τετραγωνικής τιμής (RMS) και φασματικής πυκνότητας ισχύος (PSD). Επιπλέον, δοκιμάζεται η εφαρμογή της μεθόδου Φασματικής Κύρτωσης (SK) για την κατασκευή ζωνοπερατών φίλτρων, τα οποία διαχωρίζουν τα χαρακτηριστικά της σπηλαίωσης από το μετρούμενο σήμα.

Παράλληλα με τις πειραματικές μετρήσεις, μοντελοποιείται η ροή εντός της μηχανής σε συνθήκες με και χωρίς σπηλαίωση, με χρήση εμπορικού λογισμικού υπολογιστικής

ρευστοδυναμικής. Η υπολογιστική προσέγγιση περιλαμβάνει την επίλυση των εξισώσεων Reynolds Averaged Navier Stokes Equations (RANS), μαζί με μια πρόσθετη εξίσωση μεταφοράς, για τον υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς μάζας μεταξύ της υγρής φάσης και του ατμού. Το μοντέλο k- ω SST επιλέγεται για την μοντελοποίηση της τύρβης, ενώ για τις περιοχές του υπολογιστικού χωρίου που ανήκουν στην περιστρεφόμενη πτερωτή επιλέγεται η επίλυση των εξισώσεων της ροής στο στρεφόμενο σύστημα αναφοράς.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των αντλιών κατασκευάζονται για όλες τις πτερωτές των δύο διατάξεων και η συμπεριφορά τους προέκυψε απόλυτα συμβατή με τη θεωρητική φυγοκεντρικών αντλιών παρόμοιου ειδικού αριθμού στρωφών. Για τις μετρήσεις σε συνθήκες σπηλαιώσης, η ρύθμιση της πίεσης στην είσοδο της αντλίας επιτυγχάνεται μέσω στραγγαλισμού της βάνας αναρρόφησης. Καθώς μειώνεται η πίεση, αρχίζει να εξελίσσεται το φαινόμενο της σπηλαιώσης στην πτερωτή, με την εμφάνιση φυσαλίδων ατμού και την προοδευτική αύξηση της περιοχής διαφασικής ροής. Η τιμή του ολικού ύψους της αντλίας παραμένει σταθερή, μέχρι το σημείο όπου η περιοχή του ατμού αρχίζει να καλύπτει σχεδόν όλο το εύρος της ροής μεταξύ των πτερυγίων, μειώνοντας τη δυνατότητα πρόσδοσης ισχύος στο εργαζόμενο μέσο και προκαλώντας απότομη πτώση του ολικού ύψους. Τα αποτελέσματα των οπτικών παρατηρήσεων εντός των πτερωτών του LU, απεικονίζουν την εμφάνιση των πρώτων φυσαλίδων ατμού και τη σταδιακή ανάπτυξη τους, όσο τα επίπεδα στατικής πίεσης εντός της διάταξης μειώνονται. Επιπλέον, οι φωτογραφίες των οπτικών παρατηρήσεων, αναδεικνύουν τη συνύπαρξη διαφόρων ειδών σπηλαιώσης εντός της πτερωτής, όπως ‘travelling bubble’, ‘cloud’, ‘tip clearance’, και ‘attached’ σπηλαιώσης.

Τα αποτελέσματα των οπτικών παρατηρήσεων και οι πειραματικές μετρήσεις πιστοποιούν τη δυνατότητα του αριθμητικού μοντέλου να προβλέψει την πτώση του ολικού ύψους της αντλίας. Το μοντέλο δυσκολεύεται να αναγνωρίσει την εμφάνιση των πρώτων φυσαλίδων ατμού, καθώς στα πρώτα στάδια ανάπτυξης το φαινόμενο παρουσιάζει ιδιαίτερα ασταθή συμπεριφορά. Ωστόσο, η ικανότητα του μοντέλου να προβλέψει τη θέση, την έκταση και το σχήμα της ατμοποιημένης περιοχής βελτιώνεται αισθητά στα ενδιάμεσα στάδια ανάπτυξης του φαινομένου και πριν την πτώση του υδραυλικού ύψους. Επομένως, η προτεινόμενη υπολογιστική μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διάγνωση του φαινομένου, αλλά προϋποθέτει την ακριβή γνώση όλων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της μηχανής και της εγκατάστασης, καθώς και τα δεδομένα λειτουργίας της. Επιπρόσθετα, στην περίπτωση της πτερωτής ημιανοικτού τύπου, τα αριθμητικά αποτελέσματα φανερώνουν τα περίπλοκα χαρακτηριστικά της ροής στο διάκενο μεταξύ του πτερυγίου και του κελύφους, απεικονίζοντας μια κυκλοφορία της ροής μέσω του διακένου προς την πλευρά υποπίεσης του πτερυγίου (‘backflow’). Όταν η μηχανή λειτουργεί σε συνθήκες πρόκλησης σπηλαιώσης, η κυκλοφορία αυτή μεταφέρει και φυσαλίδες ατμού που δημιουργούνται στο στενό διάκενο (‘backflow tip cavitation’).

Οι μετρήσεις θορύβου και κραδασμών λαμβάνονται από τα επιταχυνσιόμετρα και τον ακουστικό αισθητήρα, όργανα που τοποθετούνται στο σώμα (κέλυφος) των δύο φυγοκεντρικών αντλιών. Οι πρωτογενείς μετρήσεις σε συνθήκες πτώσης του ολικού ύψους λόγω σπηλαιώσης αναδεικνύουν την ύπαρξη κρουστικών σημάτων, που σχετίζονται με την ενδόρρηξη των φυσαλίδων ατμού. Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων επιτυγχάνει να συσχετίσει τις προαναφερθείσες διαφοροποιήσεις με το μέγεθος της κύρτωσης του σήματος (τέταρτη ροπή), η τιμή της οποίας αποκλίνει σημαντικά από την κανονική κατανομή. Η μελέτη του πεδίου συχνοτήτων των δυναμικών μετρήσεων απεικονίζει τη διέγερση μεγάλου εύρους συχνοτήτων. Επομένως, προκρίνεται η χρήση ‘RMS’ και ‘powerband’ εργαλείων, με στόχο την ποσοτικοποίηση της έντασης των διεγέρσεων και την αποτύπωσή τους σε σχέση με τις συνθήκες αναρρόφησης. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την επιτυχή χρήση των παραπάνω εργαλείων για την έγκαιρη διάγνωση της σπηλαιώσης, στην πλειονότητα των υπό εξέταση συνθηκών λειτουργίας. Ωστόσο, η δυσκολία τους να αναγνωρίσουν το φαινόμενο σε μερικές παροχές της κλειστού τύπου πτερωτής, σε συνδυασμό με τον κίνδυνο να εκληφθεί ένας άλλος τύπος

σφάλματος (π.χ. σε έδρανα κύλισης, που προκαλεί επίσης κρουστικά σήματα) ως σπηλαίωση, καθιστούν αναγκαία την περαιτέρω ανάλυση των σημάτων.

Γι' αυτόν τον λόγο, εφαρμόστηκε η μέθοδος Φασματικής Κύρτωσης με στόχο την κατασκευή ζωνοπερατών φίλτρων (bandpass filters), τα οποία δύνανται να απομονώσουν τα χαρακτηριστικά του φαινομένου από το συνολικό μετρούμενο σήμα. Επιπλέον, οι φιλτραρισμένες χρονοσειρές αποδιαμορφώνονται με χρήση του μετασχηματισμού Hilbert, με στόχο την επιβεβαίωση της ύπαρξης πιθανής περιοδικότητας στα χαρακτηριστικά των φιλτραρισμένων σημάτων. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της μεθοδολογίας, η οποία επιτυγχάνει να απομονώσει τους κρουστικούς παλμούς στις φιλτραρισμένες χρονοσειρές, και οι οποίοι διαμορφώνονται από την αλληλεπίδραση της στρεφόμενης περωτής με το σταθερό κέλυφος της αντλίας. Η προτεινόμενη προσέγγιση αναδεικνύει τη συσχέτιση μεταξύ της κρουστικής συμπεριφοράς του επεξεργασμένου σήματος και του μηχανισμού ενδόρρηξης των φυσαλίδων ατμού, καθώς και μεταξύ της διαμόρφωσης από τη συχνότητα περάσματος των περυγίων, καθώς το φαινόμενο λαμβάνει χώρα εντός της στρεφόμενης περωτής. Το τελευταίο συμπέρασμα συνδέει τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για τη διάγνωση του φαινομένου με το φυσικό μηχανισμό της βλάβης και διαμορφώνει ένα γενικό και αξιόπιστο εργαλείο διάγνωσης της ανάπτυξης σπηλαίωσης εντός των υδροδυναμικών μηχανών.